

MARTIM PORTUGAL V. FERREIRA
Coordenação

A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos

VOL. 1 • GEOLOGIA DE ENGENHARIA



Coimbra • Imprensa da Universidade

AVALIAÇÃO DA ESCAVABILIDADE DE UMA FUNDAÇÃO NO GRÉS DE SILVES, COM BASE NAS VELOCIDADES SÍSMICAS

MÁRIO QUINTA FERREIRA ¹ e FERNANDO PEDRO FIGUEIREDO ²

PALAVRAS CHAVE: velocidades sísmicas, escavabilidade, geologia de engenharia.

KEY WORDS: seismic velocities, excavability, engineering geology.

RESUMO

Durante as escavações para implantar um grande edifício em Coimbra verificou-se grande variação da resistência ao desmonte dos arenitos da formação do *Grés de Silves*. Procurando quantificar e justificar as variações nas condições de escavação encontradas, procedeu-se à medição das velocidades das ondas sísmicas primárias (ondas P). Como as superfícies que melhor permitiam a caracterização dos volumes escavados eram os taludes sub-verticais resultantes das escavações, deixadas nos limites exteriores do terreno e entre os blocos das sapatas, houve necessidade de utilizar uma técnica pouco comum, recorrendo a geofones específicos para a determinação das ondas S, cravados na posição horizontal, o que permitiu registar com rigor as ondas P. No local o *Grés de Silves* apresenta variações muito grandes de cimentação, quer no tipo de cimento (silicioso ou ferruginoso) quer em particular na sua quantidade, conferindo ao terreno desde um comportamento muito próximo do terroso, até ao de uma rocha resistente que requer a utilização de explosivos para o seu desmonte. Os resultados das velocidades sísmicas mostram que apenas um dos locais ensaiados apresentou valores de velocidade sísmica considerada marginal, de acordo com a tabela de ripabilidades, sendo a generalidade do terreno escavável com meios mecânicos.

¹ Geólogo de Engenharia. Universidade de Coimbra, Dep. Ciências da Terra. (mqf@ci.uc.pt)

² Engenheiro de Minas. Universidade de Coimbra, Dep. Ciências da Terra. (fpedro@ci.uc.pt).

ABSTRACT: Assessment the excavability of the Grés de Silves with seismic velocities

During the excavation for the construction of a large building in Coimbra, it was found a wide variability of the excavation resistance of the sandstones of the *Grés de Silves* formation. In order to quantify and to understand the variability in the excavation conditions the seismic velocity of the P waves was measured. As the outcrop surfaces that allowed the better measurement conditions were the vertical ones, resulting from the excavation for the foundation and walls of the building, it became necessary to use an unusual technique, with the geophones specific for the determination of the S waves, staked to the ground in the horizontal position, allowing to measure the P waves. The sandstone shows great variations in cement type (siliceous or ferruginous) and quantity, conferring to the ground a behavior from a soil to a rock that required the use of explosives to blast the excavation. The analysis of the seismic velocities showed that only one of the tested places could be considered marginal, according with the rippability chart, while the rest of places could be excavated by mechanical equipment.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho teve por objectivo avaliar as características de escavabilidade dos terrenos através das velocidades sísmicas, a partir das superfícies de escavação existentes, localizados na proximidade de um edifício de grandes dimensões situado na zona sul de Coimbra. A partir das características dos terrenos expostos pelos trabalhos de escavação procurou-se avaliar as condições de escavabilidade dos terrenos que foram removidos, ou que se encontravam em continuidade com as superfícies observadas.

A implantação do edifício foi efectuada em vários níveis, acompanhando em parte a topografia da colina, existindo diversos volumes de terreno que ficaram “in situ”, entre os locais de implantação das fundações.

Em diversos locais, foi possível efectuar uma análise pormenorizada dos volumes ainda intactos, permitindo uma interpretação fiável das características dos terrenos escavados, adjacentes às superfícies expostas.

Durante os trabalhos de escavação foram essencialmente utilizados meios mecânicos e esporadicamente explosivos. A designação de escavação com “meios mecânicos” engloba a utilização de quaisquer equipamentos de escavação que permitam remover os terrenos sem o recurso a explosivos. Inclui-se nesta designação genérica a utilização de pás mecânicas, incluindo giratórias e a utilização de *rippers* com a finalidade de soltar o terreno, facilitando o trabalho dos outros meios mecânicos de escavação.

Por vezes recorre-se à utilização de martelos demolidores de elevada energia, quando ocorrem zonas com materiais resistentes, não ripáveis, que pelas suas características de heterogeneidade e/ou reduzido volume, não justificam o recurso a explosivos, apesar do terreno possuir características adequadas ao seu uso.

A designação de escavação com “explosivos” refere-se às situações em que o desmonte apenas pode ser realizado com eficiência recorrendo à utilização de explosivos, por não ter sido conseguido o desmonte com os equipamentos referidos para a escavação com “meios mecânicos”.

2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DOS TERRENOS COM IMPORTÂNCIA NA ESCAVABILIDADE

Nos projectos de engenharia é vulgar haver uma insuficiente avaliação das características de escavabilidade dos terrenos, recorrendo-se, como alternativa, a fórmulas contratuais do tipo “escavação em terreno de qualquer natureza”. Esta situação gera, por vezes, graves problemas em obra, quando as dificuldades de escavação ultrapassam níveis correntes, ou seja quando os terrenos possuem volumes rochosos importantes ou, quando mesmo em pequena quantidade, a rocha possui elevada resistência ou grande variabilidade das condições de desmonte. A escavabilidade dos terrenos depende essencialmente da litologia, do estado de alteração e da estrutura geológica do maciço.

No que se refere ao caso em estudo, a geologia do local é constituída por duas unidades principais: solos de cobertura e arenitos. Os arenitos são do Triásico e pertencem à formação dos *Grés de Silves* (SOARES *et al.*, 1985).

Os solos de cobertura são materiais recentes (do Quaternário) resultantes quer da alteração e remobilização superficial dos *Grés de Silves* quer da remobilização dos depósitos existentes no cimo da colina do Pinhal de Marrocos. Apresentam essencialmente cor acastanhada e espessura variável, desde algumas dezenas de centímetros até poucos metros. A granulometria é essencialmente arenosa, com percentagens variáveis de silte, muito pouca argila, e elementos grosseiros dispersos, constituídos por seixos e alguns blocos, essencialmente de quartzito. Os solos de cobertura podem ser facilmente observados no perímetro da escavação apresentando espessuras entre 1 e 4 m.

A espessura dos sedimentos de cobertura é pouco significativa em relação à altura total de escavação, que ronda um valor máximo da ordem dos 15 m pelo que a generalidade da escavação foi efectuada na unidade dos arenitos do Triásico.

Os arenitos são rochas sedimentares, formadas em ambiente continental, constituídas essencialmente por partículas da dimensão das areias, por vezes com seixos, possuindo níveis com abundância de silte. As variações granulométricas são mais notórias na vertical, possuindo camadas com pouca regularidade, com

sequências de materiais mais finos intercalando com mais grosseiros. A espessura das camadas é variável desde alguns centímetros até vários metros. A variação granulométrica na horizontal é pouco significativa, sendo possível definir os estratos com algum rigor.

A tonalidade predominante é nos tons avermelhados, podendo variar desde o esbranquiçado até ao acastanhado. Aglutinando os grãos encontramos essencialmente cimento silicioso (incolores a esbranquiçados) e/ou ferruginoso (avermelhado, acastanhado ou amarelado) com distribuição heterogênea. De um modo geral o cimento silicioso confere maior resistência aos arenitos do que o cimento ferruginoso.

A escavabilidade dos arenitos depende essencialmente do tipo e quantidade do cimento, pelo que apresentam condições de escavabilidade muito variáveis. A natureza siliciosa dos grãos associada ao cimento também silicioso dificultam o desmonte e tornam os arenitos bastante abrasivos.

As sondagens mecânicas à percussão executadas para este projecto descrevem os arenitos (grés) como sendo areia, podendo induzir em erro quem desconheça a geologia local. É de ter presente a importância e significado da terminologia geológica utilizada em geotecnia que, sem margem para dúvidas, coloca todos os arenitos no grupo das rochas sedimentares detríticas, enquanto que as areias são classificados como solos.

3. MÉTODO SÍSMICO

A impedância sísmica é o produto da velocidade de propagação das ondas pela densidade dos materiais onde se propagam. Sempre que os solos e rochas evidenciem contraste de impedância ocorrem nas interfaces fenómenos de reflexão e refração de ondas (ALMEIDA, 1999). Uma onda sísmica é uma perturbação mecânica que se propaga num meio a partir de um foco, diminuindo a sua intensidade por espalhamento e atenuação à medida que se afasta da sua origem. As ondas volumétricas são designadas por ondas primárias, P, quando são compressivas, ou designadas por ondas secundárias, S, quando são de corte (MOONEY, 1984).

Como o mecanismo da propagação da deformação (velocidade de onda) está dependente dos parâmetros elásticos do meio e da sua continuidade, o método sísmico tem grande aplicação em geotecnia. Uma aplicação corrente consiste em utilizar as velocidades de propagação das ondas P para estimar as características de desmonte de um terreno. Assim é possível avaliar se um terreno será escavável, ripável ou se deve ser desmontado com explosivos. Existem técnicas aplicáveis a partir da superfície (reflexão e refração) e em furos de sondagem (sísmica directa e tomografia sísmica). O método de reflexão sísmica a pequena profundidade e a tomografia entre furos está nos limites da investigação pelo que será uma técnica de utilização corrente num futuro próximo.

Ao nível das técnicas de elevada resolução espacial, a que geralmente é mais utilizada, é a da refração sísmica. A geometria de aquisição de dados para um perfil de refração sísmica implica a colocação de geofones segundo um alinhamento à superfície do terreno. Nos extremos e, eventualmente no centro desse perfil o operador gera um impulso, com um maço metálico ou com explosivos, que se propaga a partir do foco, atingindo por um lado cada geofone sucessivamente mais afastado e por outro a interface entre as várias unidades geotécnicas (solo ou rocha), onde se decompõe em ondas refractadas e em ondas reflectidas (TELFORD *et al.*, 1976). Num registo tempo-distância determinam-se as primeiras chegadas, nas quais se apoia a interpretação do modelo de terreno. Pode-se considerar que a aplicação deste método é útil no projecto de vias de comunicação, túneis, obras de arte e edifícios de grande porte no sentido de definir a geometria do substracto rochoso e as velocidades sísmicas nos terrenos, possibilitando também a avaliação das características de desmonte dos terrenos.

4. DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES SÍSMICAS

Antes da topografia do terreno ter sido alterada em resultado das escavações, poderia ter sido feita uma campanha de prospecção geofísica com a realização de perfis de sísmica de refração para a caracterização do maciço e a definição das condições de desmonte.

Como a morfologia conferida ao terreno, após a execução das escavações para a implantação das fundações do edifício, não permitia a realização dos perfis de sísmica de refração, optou-se por uma técnica não convencional, pois que os melhores locais para a implantação dos geofones eram os taludes semi-verticais resultantes das escavações (fig. 1). Além disso parte da estrutura do edifício já tinha sido construída, limitando a área disponível para caracterização do maciço. A técnica aplicada permitiu caracterizar dos locais ensaiados, tendo sido utilizada a tabela de ripabilidades (fig. 2) para análise da aptidão do terreno ao desmonte.

Foram definidos sete perfis em zonas previamente seleccionadas de modo a cobrir os diversos tipos de terrenos encontrados durante a escavação. Para a realização destes perfis foram utilizados geofones para medir ondas S, embora eles tenham lido a chegada das ondas P, visto que foram instalados nos taludes sub-verticais, ao contrário da técnica tradicional em que os geofones são implantados na superfície do solo, em planos horizontais ou semi-horizontais. Para a colocação dos geofones na superfície da rocha houve necessidade de efectuar pequenos furos, perpendiculares ao talude, com cerca de 10 cm de profundidade, utilizando um berbequim com uma broca de 7 mm de diâmetro. Este procedimento permitiu uma boa cravação dos geofones nos taludes, utilizando um maço de borracha, assegurando um bom contacto físico com o maciço rochoso.

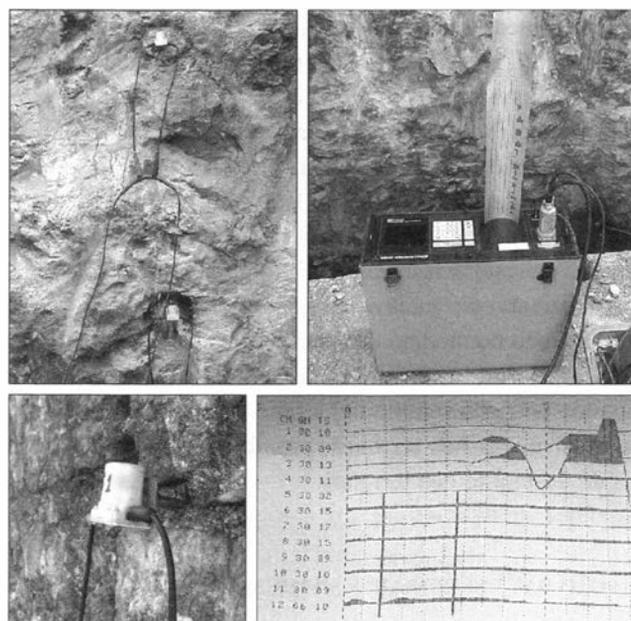


Fig. 1 – Equipamento utilizado para a determinação das velocidades das ondas sísmicas. Em cima, à esquerda: geofones cravados no talude vertical. Em cima, à direita: o sísmógrafo utilizado. Em baixo: Pormenor de um geofone utilizado e um exemplo de registo sísmico obtido.

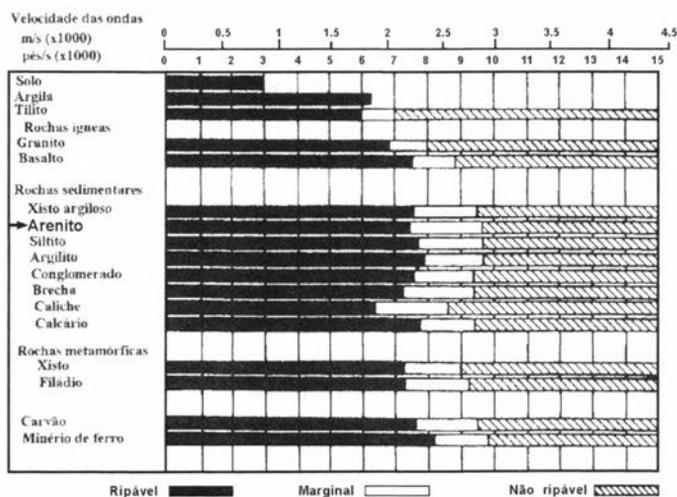


Fig. 2 – Tabela de ripabilidade para o *ripper* D8L da Caterpillar (modificado de CATERPILLAR, 1992).

Como o objectivo do trabalho era a caracterização pontual do maciço foram feitos perfis curtos, com um comprimento adequado, mas sempre com a preocupação de cada perfil estar localizado numa zona representativa do maciço.

Na execução de cada perfil foram usados quatro geofones, com uma frequência de 14 Hz, tendo sido efectuado os tiros directo e inverso. Em cada ponto de medida foram implantados dois geofones espaçados 1 m na vertical (fig. 1), o que permitiu efectuar quatro medições das velocidades por perfil e verificar a fiabilidade dos resultados obtidos individualmente.

Os resultados obtidos na prospecção geofísica, em conjunto com o reconhecimento geológico e geotécnico, permitiram estimar as características de escavabilidade dos terrenos. Com efeito, o conhecimento dos valores das velocidades de propagação das ondas sísmicas longitudinais, nos diferentes tipos de terreno, constitui um bom índice para essa avaliação.

Este procedimento é amplamente utilizado nas grandes obras rodoviárias, tal como o demonstram os cadernos de encargos do IEP ou da BRISA. No essencial baseia-se na determinação das condições de desmorte do terreno, conhecendo a natureza geológica dos terrenos e a velocidade de propagação das ondas primárias, utilizando como referência, por exemplo, a tabela desenvolvida para o *ripper* D8L da Caterpillar. Definem-se então três campos em que o terreno é considerado ripável recorrendo a “meios mecânicos”, marginal, ou não ripável para diversos materiais geológicos (fig. 2).

Será de ter em conta que os critérios em que se baseia a atribuição dos meios de escavação, mecânicos ou com explosivos, utiliza informação que é obtida indirectamente, não sendo exaustiva, pelo que é usual também utilizar os elementos obtidos nas observações efectuadas à superfície, em cortes existentes no terreno, e os dados obtidos com a prospecção e caracterização mecânica.

6. ENSAIOS REALIZADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os ensaios realizados estão localizados na Figura 3 e identificados com pares de letras (AB, CD, EF, GH, IJ, KL e MN).

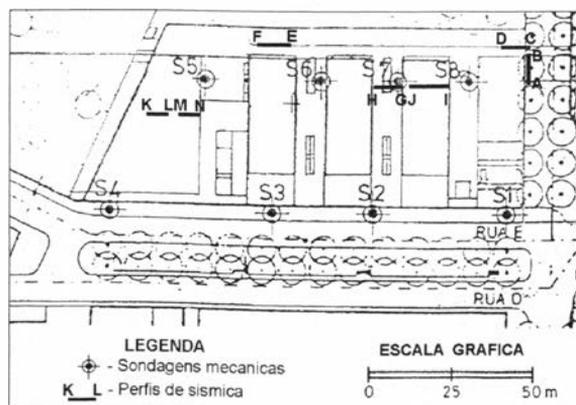


Fig. 3 – Planta de localização dos ensaios realizados.

Em todos os perfis foram medidas as velocidades segundo os dois sentidos, e determinado o valor médio das velocidades sísmicas nestes locais.

Na Tabela I são apresentados os comprimentos dos perfis e os tempos medidos, o que permitiu determinar a velocidade das ondas sísmicas no volume de rocha entre os pontos extremos dos perfis.

Tabela I – Resultados das medições das velocidades de propagação das ondas sísmicas nos diversos perfis.

Locais (e sentido da medição)	Tempos (ms)	Distâncias (m)	Velocidades (m/s)	Vel. média (m/s)	Dificuldade de Escavação	Ripabilidade	Obs.
AB	3,338	5,27	1579	1582	Difícil	Ripável	Arenitos finos, vermelhos com intercalações siltsosas
BA	3,325	5,27	1585				
CD	3,675	6,75	1837	1732	Difícil	Ripável	
DC	4,150	6,75	1627				
EF	3,375	7,40	2193	2280	Muito Difícil	Marginal*	Cimento silicioso. Utilizados explosivos.
FE	3,125	7,40	2368				
GH	14,875	6,10	410	413	Fácil	Ripável	Arenitos médios a grosseiros, claros, mal cimentados por óxidos.
HG	14,650	6,10	416				
IJ	13,925	10,80	776	777	Fácil	Ripável	
JI	13,875	10,80	778				
KL ₁	2,750	1,40	509	732	Variável (moderada)	Ripável	Arenitos médios a grosseiros, castanhos. Cimentação heterogénea por óxidos.
LK ₁	4,125	3,94	955				
KL ₂	4,250	4,12	969	786	Variável (moderada)	Ripável	
LK ₂	2,625	1,58	602				
MN ₁	6,500	3,04	468	452	Variável (moderada)	Ripável	
NM ₁	11,500	5,01	436				
MN ₂	6,125	2,65	433	535	Variável (moderada)	Ripável	
NM ₂	7,250	4,62	637				

*Marginal, significa que o terreno necessita do uso de explosivos, podendo ser ripável, em função das características locais.

₁ ou ₂ correspondem a ensaios com locais de geração da onda sísmica diferentes.

Na figura 4 apresentam-se aspectos dos locais de execução dos perfis AB e CD, localizados respectivamente no talude de escavação nascente e no talude de escavação norte, no canto noroeste do edifício. Os arenitos são finos, de tons avermelhados a esbranquiçados, com intercalações de níveis mais siltsosos de cor vermelha. As velocidades médias obtidas para os perfis AB e CD foram respectivamente de 1582 m/s e de 1732 m/s. Apesar de elevadas, estas velocidades ainda se situam dentro do domínio dos materiais ripáveis segundo a carta de ripabilidade para o *ripper* D8L da Caterpillar, apresentada na figura 2.

O perfil EF foi realizado no talude de escavação norte, na metade poente, correspondendo à zona onde foram efectuados 3 desmontes com explosivos. A figura 5 mostra o aspecto do local de execução do perfis EF.

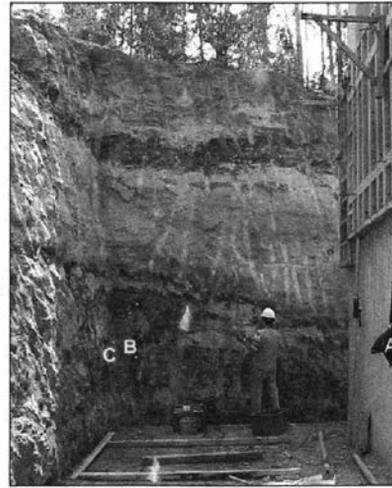
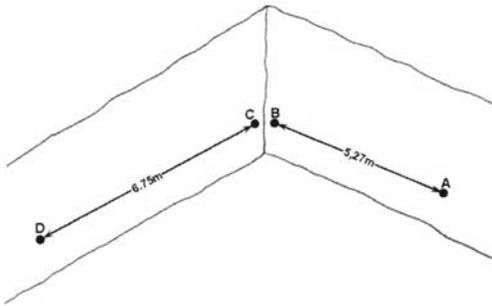


Fig. 4 – Esboço do local de implantação dos geofones e aspectos dos locais de execução dos perfis AB e CD.

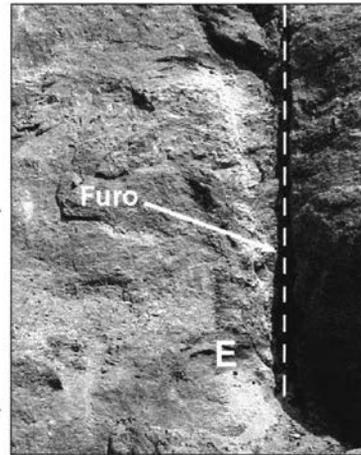
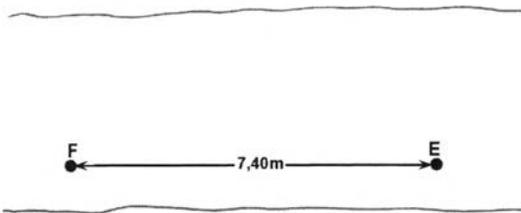


Fig. 5 – Esboço do local de implantação dos geofones e aspecto do local de execução do perfis EF. Neste local foram utilizados explosivos, sendo visível, à direita, vestígios do furo utilizado.

Os arenitos são de grão médio, com cimento silicioso, apresentando tons claros, amarelo-acastanhados. A velocidade média de propagação das ondas sísmicas foi 2280 m/s, com um valor máximo de 2368 m/s. Estes valores de velocidades correspondem à zona marginal da carta de ripabilidade para o *ripper* D8L da Caterpillar (figura 2).

A zona designada como marginal significa que o terreno necessita do uso de explosivos, podendo no entanto ser ripável, dependendo das características locais

e da potência do *ripper* utilizado. Como nesta zona o maciço praticamente não apresenta descontinuidades e as bancadas são muito espessas, não é possível executar a ripagem do terreno com eficiência. Outro equipamento possível de utilizar nestas condições seriam os martelos demolidores de elevada energia, que no entanto têm rendimentos bastante baixos, a crescer à elevada abrasividade e dureza dos arenitos quartzosos e ao impacte ambiental provocado pelas vibrações e ruído contínuo.

Para caracterizar a zona central da escavação foram efectuados ensaios “in situ” no patamar mais elevado, locais GH e IJ, junto ao degrau para o patamar intermédio, tal como se observa nas Figura 6. Na zona encontramos arenitos de grão médio a grosseiro, pouco cimentados, essencialmente por óxidos de ferro, apresentando tons acastanhados. As médias das velocidades obtidas atestam bem a facilidade de escavação destes materiais, que foi executada com meios mecânicos, apresentando valores de 413 m/s no perfil GH e de 777 m/s no perfil IJ.

No interior do edifício, na cave ao nível do arruamento principal, foram realizados dois ensaios para cada um dos perfis KL e MN. Para a realização deste perfil foram utilizados os pontos K', L' e M', N' para geração da onda sísmica (figura 7), pois verificou-se que a proximidade das sapatas do edifício influenciava os resultados, ao criar caminhos preferenciais de maior velocidade sísmica.

Localmente os arenitos são de grão médio a grosseiro, com cimentação muito heterogénea, apresentando tons acastanhados.

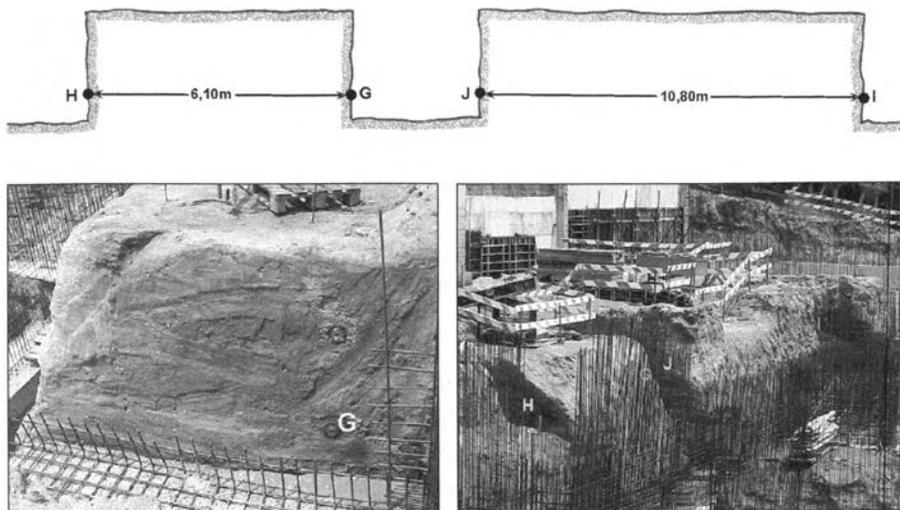


Fig. 6 – No topo da figura está representada a planta de localização dos perfis GH e IJ. Em baixo à direita vista geral do local de implantação destes dois perfis. Em baixo à esquerda, pormenor do maciço e do local de medida G.

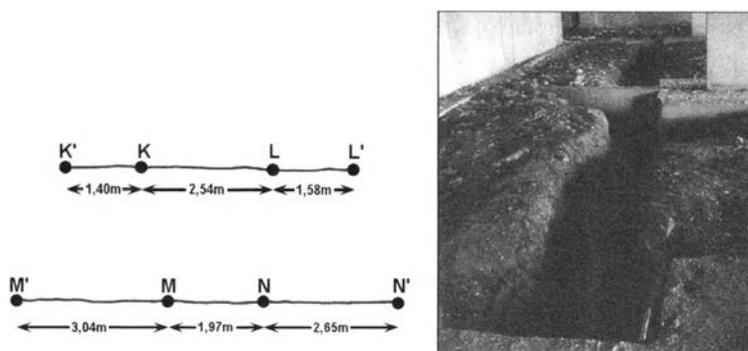


Fig. 7– Esboço da localização dos geofones e dos locais de geração da onda sísmica dos perfis KL e MN. Aspecto do local no interior do edifício onde foram efectuados os perfis.

Os resultados das médias das velocidades sísmicas para o perfil KL variam entre 732 m/s e 786 m/s. Para o perfil MN as médias das velocidades sísmicas variam entre 452 m/s e 535 m/s. Qualquer dos valores obtidos para estes perfis confirma a facilidade de escavação no local em que a escavação foi executada com meios mecânicos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As sondagens mecânicas à percussão executadas para este projecto, descrevendo os arenitos como sendo areia, terão levado a considerar que se trataria de uma escavação em solos, o que não se veio a confirmar em obra.

A interpretação da estrutura geológica local mostrou que as camadas inclinam suavemente para SW. Os resultados das velocidades sísmicas mostram que as camadas superiores, aflorantes no patamar mais elevado das fundações e na face norte da escavação, exibem maiores valores de velocidades sísmicas que nas camadas inferiores aflorantes no patamar intermédio e ao nível do arruamento.

A realização de perfis de sísmica de refração, numa fase anterior às escavações efectuadas, não teria fornecido bons resultados devido à inversão de velocidades sísmicas em profundidade, o que poderia ter induzido a erros na interpretação e na selecção do método de desmonte.

A técnica utilizada para medir as ondas P nos taludes sub-verticais das fundações do edifício, recorrendo aos geofones das ondas S, mostrou-se perfeitamente adequada para a determinação das velocidades de propagação das ondas sísmicas. Os resultados das velocidades sísmicas mostraram que apenas um dos locais ensaiados, o local correspondente ao perfil EF, apresenta características de escavabilidade que não são possíveis de desmontar com meios mecânicos correntes, sendo necessário recorrer a explosivos ou a martelos demolidores.

Os valores das velocidades das ondas sísmicas obtidas neste trabalho, para os arenitos com velocidades sísmicas mais elevadas, são idênticos aos valores obtidos por SEABRA (1989) num trabalho efectuado para caracterização de maciços rochosos por sísmica de refração e ultra sons, na região de Coimbra.

Os restantes locais apresentam características compatíveis para serem efectuadas através do desmonte com meios mecânicos, ou seja são possíveis de desmontar recorrendo a equipamentos do tipo pás mecânicas, eventualmente após a utilização de um *ripper* para soltar o terreno, nos locais com velocidades mais elevadas.

AGRADECIMENTOS

À empresa de construção OPCA, S.A. pelas facilidades concedidas na aquisição de dados e realização do trabalho, ao Gabinete Técnico da Reitoria da U.C. e ao Instituto Pedro Nunes. Este trabalho foi realizado no âmbito do Centro de Geociências da Universidade de Coimbra.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, F., 1999 – Geofísica aplicada no desenvolvimento de projectos. *Actas da 6ª Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente*, vol. nº 2, pp. 685-694. Lisboa.
- CATERPILLAR, 1992 - *Caterpillar performance handbook*. Caterpillar.
- FERREIRA, M. Q. e FIGUEIREDO, F. P., 2002 – Avaliação da escavabilidade dos terrenos de implantação da Unidade Pedagógica Central do Polo II - Universidade de Coimbra. Relatório interno. Instituto Pedro Nunes, Coimbra.
- MOONEY, H. M., 1984 – *Handbook of Engineering Geophysics*. Volume 1: Seismic. Bison Instruments, Inc. U.S.A..
- SEABRA, A. E. R. O., 1989 – Contribuição para o conhecimento das características de elasticidade dinâmica do Grés de Silves em Coimbra. *Memórias e Notícias* nº. 107, Publicação do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da U. C.
- SOARES, A. F., MARQUES, J. F. e ROCHA, R. B., 1985 – Contribuição para o conhecimento geológico de Coimbra. *Memórias e Notícias* nº. 100, Publicação do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. e KEYS, D. A., 1976 – *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Nova York, E.U.A.